شبیه‌سازی کامپیوتری فرسایش زانویی با جوش محیطی در جریان دوفازی گازجامد*

مقاله علمی – پژوهشی

فرناز حسینی[۱]   امیرهمایون مقدادی[۲]   محسن دوازده‌امامی[۳]   ابراهیم محسنی هماگرانی[٤]   نسیم نجاری[٥]

چکیده *فرآیندهای اولیه‌ای که در تأسیسات بهره‌برداری ایستگاه تقلیل فشار بر روی گاز طبیعی، صورت می‌گیرد کلیه آلودگی‌های آن اعم از رطوبت یا ذرات جامد را حذف نمی‌کند. در چنین شرایطی خوردگی در خطوط لوله، مسدود شدن تجهیزات ابزار دقیق و تخریب شیرها و رگلاتورها تشدید خواهد شد، بنابراین لازم است در ایستگاه‌های توزیع و تقلیل فشار برای جلوگیری از افت فشار گاز و آسیب‌دیدگی تجهیزات خط لوله، فرآیندهایی جهت جدا کردن ذرات جامد و قطرات مایع از گاز طبیعی صورت گیرد. این گزارش نخست به تعریف فرسایش جریان گاز طبیعی، پرداخته و سپس با توضیحات مختصری با استفاده از روش DPM (Discrete Phase Method) و جریان دوفازی اویلری – لاگرانژی یا به‌اختصار فازگسسته با شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوینت 2019R1 به بررسی و آنالیز فرسایش جریان گاز- جامد در زانویی با در نظر گرفتن جوش اتصال این زانو می‌پردازد. این گزارش، معادلات جریان فاز گسسته و پیوسته را بیان می‌کند. در این راستا، برای در نظر گرفتن اثرات اغتشاشی از مدل انرژی- تلفات آشفتگی (ε-Realizable k) ، برای مدل کردن رفتار ذرات در مجاورت دیوار و همچنین پراکندگی ذرات ناشی از آشفتگی در فاز سیّال با استفاده از مدل ردیابی اتفاقی مدل شده است. در مورد شرایط مرزی برخورد ذرات جامد با دیواره و مراحل حل عددی معادلات در روش فاز گسسته توضیحاتی بیان می‌شود و اثر حاضر خوردگی فرسایشی را بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که حتی در جریان‌های آرام با عدد رینولدز پایین نیز، سیّال گاز- جامد ناهمگن بوده و افزایش قطر ذرات جامد موجب افزایش ناهمگنی جریان گاز- جامد و درنهایت بروز خوردگی سایشی بیشتر در محل ناهمواری جوش می‌گردد.*

واژه‌های کلیدی گاز- جامد، فاز گسسته، اویلری- لاگرانژی، خوردگی فرسایشی.

Umerical Simulation of Elbow Erosion with Circumferential Welding in Two-Phase Gas Flow

F. Hosseini   A. H. Meghdadi Isfahani   M. Davazdah Emami   E. Mohseni   N. Najari

Abstract The initial processes that take place in the operating facilities of the pressure reduction station on natural gas do not remove all its pollutants, whether moisture or solid particles. Under such conditions, corrosion in pipelines, blockage of instrumentation equipment, and destruction of valves and regulators will be intensified, so it is necessary at distribution and pressure reduction stations to prevent gas pressure drop and damage to pipeline equipment, processes to separate solid particles. And liquefied droplets of natural gas. This report first defines natural gas flow erosion and then briefly describes the flow erosion using the Discrete Phase Method DPM and the Eulerian-Lagrangian biphasic flow, or the discrete phase abbreviated simulation using Ansys Fluent 2019R1 software. The gas-solid in the elbow deals with the welding of this elbow joint. This report describes the discrete and continuous phase flow equations. In this regard, to consider the perturbation effects of the energy-perturbation loss model (Realizable k-ε), to model the behavior of particles in the vicinity of the wall and also the scattering of particles due to perturbation in the fluid phase is modeled using random tracing model. . The boundary conditions of solid particles colliding with the wall and the steps of numerical solution of the equations in the discrete phase method are explained and the present effect investigates the erosive corrosion. The results show that even in slow currents with low Reynolds number, the gas-solid fluid is heterogeneous, and increasing the diameter of the solid particles increases the heterogeneity of the gas-solid flow and ultimately causes more abrasion corrosion at the weld roughness.

Keywords Gas-Solid, Discrete phase, Eulerian-Lagrangian, Erosion corrosion.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۱۰/٦ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۱/۲۹ می‌باشد.

DOI: 10.22067/fum-mech.v31i2.84757

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

Email : Farnazhosseini2014@gmail.com

(۲) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

(۳) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی، نجف آباد/اصفهان، اصفهان، ایران.

(٤) مدیر بازرسی فنی، واحد بازرسی فنی، شرکت گاز استان اصفهان، اصفهان، ایران.

(٥) کارشناس طراحی، واحد خدمات فنی مهندسی، شرکت گاز استان اصفهان، اصفهان،ایران.

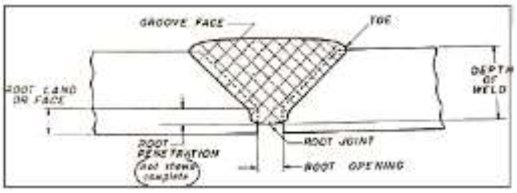
مقدّمه

ماسه در چاه‌های نفت و گاز هم‌زمان با تولید سیّال نفت و گاز ایجاد می‌شود و علی‌رغم فیلتراسیون خطوط لوله انتقال این سیّالات از پایین‌دست جریان تا نزدیکی محل‌های مصرف یعنی ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز در اطراف شهرها، به دلایل متعدّد از جمله عدم امکان پاک‌سازی کامل این ذرات از داخل خطوط لوله، همراه گاز شده و ایجاد نگرانی می‌کند، چراکه می‌تواند مشکلات مهمی از قبیل کاهش فشار، انسداد لوله و فرسایش و درنتیجه زیان‌های مالی و مسائل زیست‌محیطی را ایجاد کند. وقتی ذرّه‌ای با سطح برخورد می‌کند، سطح را زخمی می‌کند. شکل‌های این زخم‌ها به پارامترهای زیادی وابسته است از جمله ماده سطح، اندازهٔ ذرّه و زاویهٔ برخورد. محقّقان این زخم‌ها را مطالعه کرده‌اند تا مکانیسم فرسایش را تبیین کنند و در کل موافق هستند که مکانیسم فرسایش بر اساس شکل‌پذیری سطح تغییر می‌کند. از طرف دیگر زمانی که اتصالات لوله‌کشی ایستگاه مانند زانویی دارای جوش محیطی باشند، بر اساس شواهد تجربی خوردگی فرسایشی ایجادشده در اتصالاتی نظیر زانویی، تشدید می‌شود.



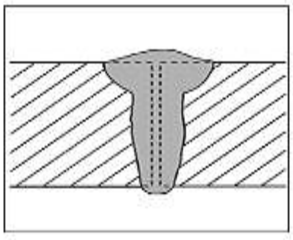
شکل (۱): شکل نمونه جوش محیطی در اتصال زانویی ایستگاه گاز[۱]

به‌عبارت‌دیگر ازآنجاکه یک ایستگاه تقلیل فشار گازی سیستمی یکپارچه شامل ولوها، اتصالات و ابزار دقیق است، لازم است سیستمی مطمئن، بدون تعمیرات و هرگونه نشتی باشد، ازاین‌رو جوشکاری برای این سیستم بسیار بااهمّیّت است. هرگاه فشار داخلی یک سیستم، بسیار زیاد باشد، جوش، امتیاز و اطمینان بالاتری نسبت به سایر اتصالات دارد. معمول‌ترین روش جوشکاری در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز، جوش نوع لب‌به‌لب (*Butt-Weld*) است که در آن انتهای دو اتصال، ماشین‌کاری شده تا در محل اتصال، تشکیل یک شکاف دهند. این شکاف هنگامی‌که مواد جوش به هم آمیخته شود پر شده و تشکیل یک اتصال مطلوب را می‌دهد [۲]. آماده‌سازی لبهٔ اتصال برای جوشکاری با توجّه به ضخامت آن انجام می‌شود. برای ضخامت‌های کم (۱/۸ تا ۱/۱۶ اینچ) جوشکاری به نحو مطلوبی با لبه‌های مربعی شکل انجام می‌شود و برای ضخامت‌های بیشتر جوش مناسب زمانی حاصل می‌شود که لبه‌های اتصال پخ زده شوند، در غیر این صورت شعله یا قوس الکتریکی قادر به تأمین گرمای لازم برای ذوب کردن و به‌هم‌آمیختن دولبه را ندارد [۳].



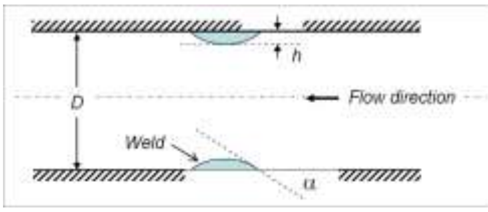
شکل (۲): جزئیات جوش شیاری لب‌به‌لب [۳]

پدیدهٔ نفوذ اضافه جوش در پاس یک جوش و به علّت ایجاد مذاب بیش‌ازحد به وجود می‌آید. مذاب حاصل در داخل مقطع جوش نفوذ کرده و پس از سرد شدن به‌صورت یک فلز اضافی شکل (۳) در محل باقی می‌ماند [۱].



شکل (۳): جوش با نفوذ اضافه در اتصالات ایستگاه‌های تقلیل [۱]

محاسبهٔ نرخ خوردگی اتصالات جوشی بر اساس هندسهٔ داخلی جوش است. درواقع، هندسهٔ جوش استحکام جوش در مقابل خوردگی را مشخص می‌کند (مطابق شکل ٤).



شکل(٤): هندسه نفوذ اضافه جوش [٦]

همان‌گونه که از هندسهٔ جوش مشخص است ضخامت جوش اضافه یا ارتفاع جوش و زاویهٔ برخورد ذرات جامد به ارتفاع نفوذ اضافه جوش، از پارامترهای مهم برای بررسی نرخ خوردگی است.

خوردگی سایشی به از بین رفتن پیوسته ماده اولیه از سطح جامد به علّت تعامل مکانیکی بین آن سطح و یک سیّال، سیّال چند جزئی و یا برخورد ذرات جامد گفته می‌شود [٤]. با توجّه به مطالعات کروک [5]، خوردگی سایشی را می‌توان به سه دستهٔ مجزا تقسیم نمود: سایش به علّت برخورد ذرات جامد، سایش جریان دوغاب و سایش به علّت برخورد قطرات مایع موجود در جریان سیّال. در این مطالعه حالت اوّل یعنی وجود ذرات جامد در سیّال گاز بررسی شده است.

سایش خوردگی به نظر می‌رسد به پارامترهای اساسی ۹ گانه زیر وابسته باشد [٤].

١- نوع ماده: برای مواد ترد مکانیزم ترک‌خوردگی در اثر خستگی سطحی و تشکیل میکروترک‌ها است و برای مواد نرم مکانیزم سایش ناشی از برخورد است؛

٢- زاویهٔ برخورد ذرات: زاویهٔ بحرانی برای مواد ترد حدود ۹۰ درجه و برای مواد نرم در حدود ۱۵ الی ۳۰ درجه است (شکل ۵)؛

٣- آیتم‌های مربوط به طراحی: نظیر میزان شعاع زانویی‌ها، هدرها و انشعابات؛

٤- میزان ماسهٔ همراه در سیّال: بر اساس درصد وزن ماسه همراه/ وزن کل سیّال؛

٥- سرعت برخورد ذرات؛

٦- سرعت سیّال؛

٧- میزان خوردگی سیّال؛

٨- ویسکوزیته سیّال؛

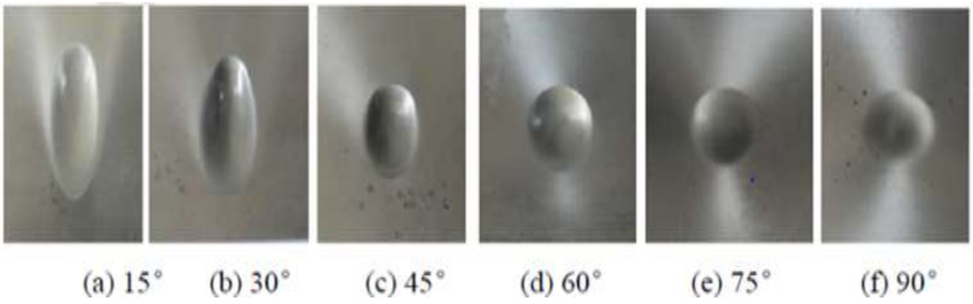
٩- چگالی سیّال.

از طرف دیگر، مجموعه استانداردهای بین‌المللی مورد استفاده در ایستگاه‌های تقلیل فشار [۷]، شامل تحقیقات مدوّنی است که از سال ۱۹۱۱ توسط انجمن مهندسین مکانیک ایالات‌متحده در زمینهٔ لوله ، ظروف تحت فشار و اتصالات جمع‌آوری‌شده و بعدها تحت عنوان استانداردهای مختلفی نظیر ASME ,API ASTM, ارائه شده است.

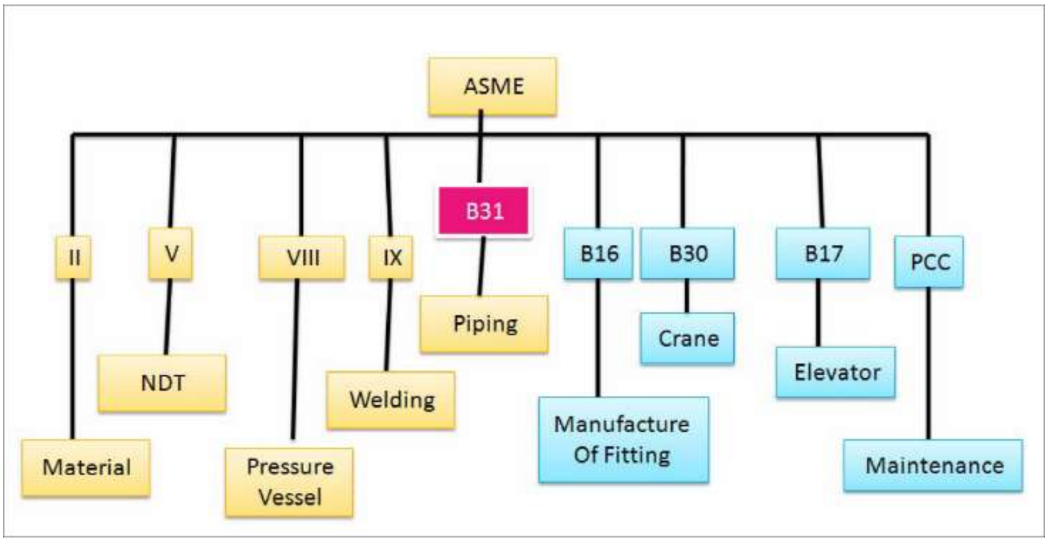
مجموعهٔ «ASME» دارای بیش از ده‌ها بخش و زیرمجموعه است به‌عنوان‌مثال ، در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز، اتصالات آن از قبیل زانویی و کاهنده و یا کپ از جنس فولاد کربن استیل و تابع استاندارد ASME/ANSI B16.2 است. استانداردی که طراحی ایستگاه از آن تبعیت می‌کند استاندارد ASME/ANSI B31.8 است که برای محاسبه ضخامت حداقل لوله تحت تنش استفاده می‌شود. و از استاندارد ASME B31.3 و ASME IX در مورد جوشکاری و معیارهای پذیرش جوش ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز استفاده می‌شود که استاندارد ASME IX دارای دو بخش جوشکاری و لحیم‌کاری است؛ ازاین‌رو لازم است حدود و میزان‌های لازم برای شبیه‌سازی جوش اتصال زانویی در این مطالعه مطابق با الزامات این استاندارد باشد.

فینی [8] در سال ۱۹۶۷ نشان داد وقتی ذرّه با زاویهٔ برخورد پایین با سطح برخورد می‌کند، حفره ایجاد می‌کند. برخوردهای دیگر ذرّه حفره را بزرگ‌تر می‌کند و ماده را اطراف حفره جمع می‌کند. مادهٔ جمع‌آوری‌شده درنهایت توسط ذرّه پیوسته تأثیرگذار از بین می‌رود. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که در مواد شکننده،

فرسایش مربوط به شکل‌گیری ترک است. وقتی ذرّه به سطح شکننده ضربه می‌زند، ترک‌های جانبی و شعاعی ایجاد می‌کند. چن و همکاران [9] در سال۲۰۰٤، توزیع فرسایندگی مسیرهای ذرات در یک زانوی استاندارد را مورد مطالعه قرار دادند. آنها از دو مدل بازسازی ذرات مختلف برای ردیابی ذرات و محاسبهٔ میزان فرسایش زانویی استفاده کردند. اسکار (Scar) فرسایشی وی‌شکل که در آن تحقیق یافت شد، به تداخل ثانویه ذرات بستگی داشت. زانگ و همکاران [10] در سال ۲۰۰۷ و ناجمی و همکاران[11] سال ۲۰۱۵، نشان دادند که فرسایش زانو ممکن است منجر به سوء عملکرد تجهیزات و حتی شکست آن شود، که خود می‌تواند موجب نشت نفت یا گاز و برخی دیگر از بلایای زیست‌محیطی شود. علاوه بر این، پیش‌بینی دقیق فرسایش منجر به ارزیابی عمر مفید خطوط لوله می‌شود. در این مطالعات از مدل اوکا و همکاران [12] و مدل ذرات گردوغبار گرانت و تباکف [13] برای محاسبهٔ نرخ فرسایش زانوی ۹۰ درجه استفاده کرد. در این زانو اسکار فرسایشی وی‌شکل مشاهده گردید.



شکل (٥): ماکرو گراف اسکارهای خوردگی ناشی از زاویهٔ برخورد متفاوت ذرات جامد با دیواره لوله زانویی [6]



شکل (٦): چارت کلّی استاندارد ASME [7]

برخورد کششی ذرات در سرعت‌های پایین‌تر به‌عنوان عامل اصلی این اسکارها محسوب شد. داود شفیعی وهمکاران [١٤] در سال ٢٠١٤، طی تحلیل عددی ایجاد سایش ناشی از جریان گاز در خطوط لوله و ایستگاه‌های گاز نشان دادند میزان سایش با افزایش سرعت گاز، افزایش ناخالصی، افزایش دما، تعدد مسیرهای منقطع، میزان ذرات، اغتشاش جریان گاز و نحوه طراحی ایستگاه ارتباط مستقیم دارد. بررسی جامع مدل‌های ارائه شده در مطالعات قبلی، توسط پارسی وهمکاران [15] در سال ٢٠١٤ انجام شده است. هدف این تحقیقات انجام شده بر مبنای CFD بررسی تأثیر ذرات جامدی مانند شن و ماسه بر جریان چند فازی است. درته وهمکاران [16] در سال ٢٠١٥، دریافتند که اثرات روش‌های بارگذاری و جابجایی جرم می‌تواند به‌طور قابل توجّهی پروفیل‌های فرسایش زانویی را تغییر دهد. به‌عنوان‌مثال، اسکار فرساینده وی‌شکل با استفاده از روش کوپلینگ یک‌طرفه رخ می‌دهد، اما هنگام استفاده از اتصال چهار طرفه این اسکار به‌صورت واضح قابل مشاهده نیست. عرب نژاد وهمکاران [17] در سال ٢٠١٥ نشان دادند، معادلات فرسایش و نرخ فرسایش به پارامترهای مهم نظیر رفتار جنس، خواص ذرات جامد و سرعت برخورد ذرات جامد و سرعت خود ذرات، مرتبط می‌شوند. ویرا [18] در سال ٢٠١٥ اثر مکانی لوله را در فرسایش یک جریان حاوی مواد فرساینده مطالعه کرد. او گزارش کرد در هر شرایطی، فرسایش در زانویی عمودی بیشتر از زانویی افقی اتفاق می‌افتد. پنگ و همکاران [19] در سال ٢٠١٦، مسیریابی ذرات و توزیع فرسایش در زانویی‌ها، تحت سرعت‌های مختلف جریان، نرخ دبی جرمی ذرات و شعاع متوسط منحنی نسبت به قطر و نیز قطر لوله با استفاده از یک مدل فرسایش، بررسی شده و درنهایت دو معادله برای پیش‌بینی مکان حداکثر فرسایش با توجّه به جهت خمش زانو، قطر ذرات و نسبت $R/_D$ ارائه گردید. مرتضی بیاره وهمکاران [٢٠] در سال ٢٠١٦، پدیده خوردگی سایشی را در یک خط لوله گاز بررسی کرده و متوجّه شدند وجود اتصالاتی نظیر زانویی که خطوط جریان را قطع می‌کنند، نرخ برخورد ذرات با ممنتوم بالا را افزایش می‌دهند و همین امر موجب افزایش خوردگی می‌شود. زمانی و همکاران [21] در سال ٢٠١٧ به بررسی نرخ فرسایش در یک زانویی با در نظر گرفتن چرخش ذرات پرداخته و به این نتیجه رسیدند که زمانی که چرخش ذرات در نظر گرفته نمی‌شود، مدار حرکت ذرات به دست آمده می‌تواند به‌طور قابل توجّهی با مسیر واقعی ذرات متفاوت باشد. در ضمن با در نظر گرفتن چرخش ذرات، با توجّه به نوع برخورد ذرّه به دیوار، برخوردهای مخرب‌تری رخ می‌دهد و نرخ سایش افزایش می‌یابد. مولا و همکاران در سال١٣٨٥ [٢٢]، پژوهشی با هدف بهینه‌سازی سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز استان فارس انجام داده‌اند. در این مطالعه پس از معرفی فرآیند فیلتراسیون گاز طبیعی و انواع مختلف فیلترها آزمایش‌های کمی و کیفی بر روی نمونه‌ی ذرات جامد موجود در گاز طبیعی ورودی به ایستگاه CGS شهر شیراز و پس از مطالعه و بررسی اشکالات موجود در سیستم فیلتراسیون ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز این استان، فرضیّه‌هایی در ارتباط با این اشکالات مطرح کرده و راهکارهایی در راستای بهبود فرآیند فیلتراسیون ارائه گردیده است. در ضمن در خصوص انتخاب مدل توربولانتی با توجّه به حقیقت ناخوشایندی که وجود دارد و آن اینکه به‌صورت عمومی معادله واحدی برای همه کلاس‌های مسائل مختلف وجود ندارد. انتخاب مدل مغشوش به ملاحظاتی مانند فیزیک جریان مسئله، نمونه‌هایی که قبلاً برای یک کلاس خاص حل شده، سطح دقت مورد نیاز، منابع محاسباتی موجود و زمان مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی بستگی دارد. برای انتخاب مدل مناسب می‌بایست قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر مدل بررسی شود لذا برای تحلیل مساله، مطالعاتی صورت گرفته [23-29] از سال

۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ انجام شده بود استفاده کرده و بر اساس آن ، نوع معادلهٔ لازم در این پژوهش مشخص گردید.

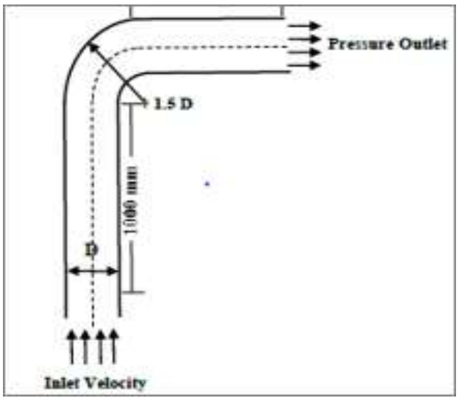
تعریف مسئله

در این پژوهش قرار است زانویی مورد استفاده برای جریان ورودی یک ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی بررسی گردد.

سیستم فیلتراسیون گاز ورودی به ایستگاه شامل یک عدد فیلتر جداکننده (Filter Separator) قبل از هدر اصلی (Main Header) و سه رن (Run) مجهز به سه فیلترخشک است که از طریق لوله و زانویی با قطر ۳ اینچ جریان گاز وارد فیلتر جداکننده شده و پس از خروج از این تجهیز، گاز از سه فیلتر مجزا عبور خواهد کرد. بر طبق استاندارد ASME B31.3 [30] ، میزان مجاز نفوذ جوش اضافه حدود ۳ میلی‌متر است.

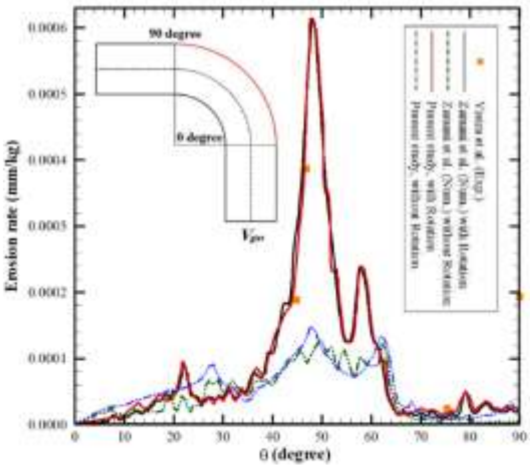
درواقع قبل از عبور جریان از فیلترهای خشک ایستگاه، گاز از طریق تجهیزی به نام سپرایتور فیلتر شده و ذرات با قطر ۵ میکرون از آن گرفته می‌شوند. بررسی پدیدهٔ خوردگی فرسایش هنگام عبور سیّال عامل گاز طبیعی به همراه ذرات جامد موجود در آن در زانویی ورودی ایستگاه، هدف این مطالعه است.

در ابتدا با توجّه به استانداردهای متداول در شرکت ملّی گاز ایران و بررسی میدانی ایستگاه شکل هندسه زانویی موجود استخراج گردید شکل (۷). در نرم‌افزار انسیس فلوئنت هندسهٔ به دست آمده شبیه‌سازی شده و ابتدا با هندسهٔ زانویی بدون جوش مطابق با پژوهش‌هایی که قبل از این در خصوص بررسی خوردگی در این اتصال انجام شده بود مطابقت داده شد. مبنای تطابق نتایج استخراج شده، پژوهشی است که در زمینهٔ بررسی خوردگی ناشی از ذرات جامد موجود در گاز توسط زمانی و همکاران [21] در سال ۲۰۱۷ انجام گرفته است. نتایج عددی به دست آمده با تقریبی بسیار خوبی بر نتایج عددی حالت بدون چرخش ذرات جامد منطبق گردید.



شکل (۷): جهت ورود سیّال و شرایط مرزی [۷]

شایان یادآوری است هندسهٔ مورد مطالعه توسط زمانی و همکاران [21]، از نظر ابعاد کاملاً با هندسهٔ پژوهش حاضر همخوانی دارد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی جدید شکل (۸) کاملاً با نتایج به دست آمده از این مطالعه مطابقت داشت.



شکل (۸): مقایسهٔ بین نتایج عددی به دست آمده از مطالعه زمانی و همکاران [21] و شبیه‌سازی این مطالعه

فرضیّات و روش حل

هندسهٔ جوش محیطی این اتصال مطابق با استانداردهای طراحی ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز ایران و ASME SECTION IX محاسبه و منظور شده است. این اتصال از نظر موقعیت بلافاصله پس از رگولاتور فشارشکن در لوله‌کشی ایستگاه تقلیل فشار قرار داشته و نوع جوش آن جوش لب‌به‌لب است. در این مطالعه از روش محاسبات

DNV(D. N. Veritas) [6]، برای بررسی فرسایش ذرات جامد در گاز و روی جوش محیطی اتصالات استفاده شده است برای حل معادلات ناویر استوکس از روش حجم محدود استفاده شده است.

در این مطالعه فرض بر این است که جریان پایا و هم‌دما باشد. همچنین در این شبیه‌سازی‌ها اثر جاذبه در نظر گرفته شده است ($g = 9.81\ m/s^2$). خواص گاز، ذرات و جنس لوله در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): شرایط سیّال عامل در جریان گاز – جامد ایستگاه تقلیل فشار

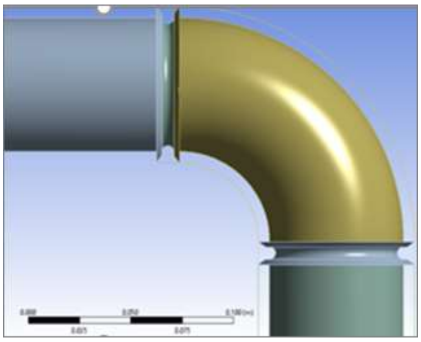
نام متغیر	مقدار در شرایط اوّل	واحد
سرعت گاز طبیعی	۲۰	m/s
سرعت ذرات جامد	۲۰	m/s
چگالی ذرات جامد (شن و ماسه)	۲٦٥۰	Kg/m^3
سختی دیواره لوله	۱۲۰	BH
چگالی سیّال عامل گاز	۰٫٦٥	Kg/m^3

در نرم‌افزار انسیس- فلوئنت جریان به کمک معادلات ناویر استوکس مدل می‌شود و ذرات از منوی مدل فاز گسسته DPM (Discrete Phase Method) پیروی می‌کنند. برای بررسی فرسایش از مدل DNV [٦]، استفاده می‌شود که نشان داده شود ذرات جامد چگونه باعث فرسایش شده و چه تأثیری بر جوش محیطی اتصالاتی که نفوذ اضافه جوش دارند می‌گذارند. برای ارتباط میان میدان‌های فشار و سرعت از روش Simple استفاده شد. در معادلات مومنتم، ترم‌های غیرخطی جابه‌جایی با روش دقیق مرتبهٔ دو، گسسته سازی شد. از روش مرتبهٔ دوم برای گسسته سازی ترم‌های فشاری استفاده شد. همان‌طور که پیش‌تر بیان گردید در مطالعه حاضر برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان از مدل آشفتگی انرژی تلفات k-ε استفاده شده است. ازآنجاکه علاوه بر سرعت متوسط، نوسانات سرعت آشفته نیز بر مدار حرکت ذرات تأثیرگذار است پراکندگی ذرات در فاز سیّال ناشی از نوسانات آشفتگی با استفاده از مدل ردیابی اتّفاقی مدل شد [29-23]. مدل گردشی تصادفی گسسته به‌منظور در نظر گرفتن برهم‌کنش میان ذرات و گردابه های آشفتگی به کار گرفته شد.

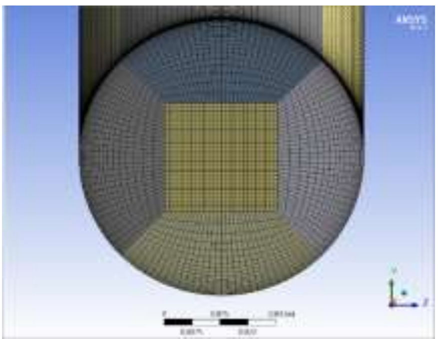
مراحل حل عددی معادلات فاز پیوسته و گسسته

کلّیه معادلات جریان و انرژی فاز پیوسته سیّال پایه با صرف‌نظر از وجود ذرات جامد فاز گسسته، تا همگرایی کامل حل می‌شود تا توزیع سرعت در تمام نقاط داخل حوزهٔ حل برای فاز پیوسته مشخص شود (مطابق شبکه‌بندی ارائه شده در شکل ۹ و۱۰).

سپس ذرات جامد فاز گسسته به‌طور یکنواخت از مرز ورودی جریان وارد شده و با حل معادلات لاگرانژی فاز گسسته تحت تأثیر فاز پیوسته تا همگرایی کامل مکان و سرعت تمام ذرات جامد در حوزهٔ حل مشخص می‌شود.



شکل (۹): هندسه زانویی با جوش شبیه‌سازی‌شده



شکل (۱۰): مقطع شبکه‌بندی‌شدهٔ زانویی

جدول (۲): مشخصات شبکه

تعداد شبکه	Skewness	Aspect Ratio
٣٢٧٣٦٠٠	٠,٧٤١١	٤٠,٢٧٣

معادلات حاکم

ابتدا معادلات حاکم بر فاز پیوسته بررسی می‌شود و معادلات آشفتگی بیان می‌گردد. معادلهٔ بقای جرم یا معادلهٔ پیوستگی در حالت کلّی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho\,\vec{u}) = S_m \qquad (١)$$

فرم کلّی معادلهٔ بقای جرم است و برای هر دو جریان تراکم پذیر و تراکم‌ناپذیر قابل استفاده است. جمله چشمه S_m جرمی است که از فاز پراکنده دوم (مثلاً در اثر تبخیر مایعات) به فاز پیوسته اضافه می‌شود که در اینجا صفر در نظر گرفته می‌شود. معادلهٔ بقای ممنتوم به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\,\vec{u}) + \nabla.(\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla P + \nabla.(\bar{\bar{\tau}}) + \rho\vec{g} + \vec{F} \qquad (٢)$$

که P فشار استاتیکی، $(\bar{\bar{\tau}})$ تانسور تنش و $\vec{F}$ و $\rho\vec{g}$ نیروی بدنه خارجی(Body force) و نیروی بدنه جاذبه (Gravitational body force) است. تانسور تنش نیز به‌صورت معادلهٔ (۳) تعریف می‌شود:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu\left[\left(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u^{T}}\right) - \frac{2}{3}\nabla.\vec{u}I\right] \qquad (٣)$$

که μ ویسکوزیته مولکولی، I تانسور یکه و جمله دوم سمت راست، اثر اتساع (dilation) حجم است. برای جریان تراکم‌ناپذیر یک سیّال نیوتونی، این معادله به معادلهٔ ناویر–استوکس (Navier-Stokes) معروف شده است. با اعمال فرض جریان ایزوترم و تراکم‌ناپذیر، جمله دانسیته می‌تواند ثابت فرض شود.

معادلات (٤) و(٥) و(٦)، موازنهٔ ریاضی بر مدل آشفتگی K-ε تحقیق‌پذیر را نشان می‌دهند. اصطلاح «تحقیق‌پذیر» بدین معناست که مدل حاضر مطابق با فیزیک جریان آشفته، قیدهای ریاضی خاصی را در تنش‌های رینولدز اعمال می‌کند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\delta t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon + S_P^k \qquad (٤)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\delta t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + S_P^2 \qquad (٥)$$

$$C_1 = MAX\left[0.43\,.\ \frac{\eta}{\eta + 5}\right] \qquad \eta = S\frac{k}{\varepsilon} \qquad (٦)$$

$$S = \sqrt{2.S_{ij}S_{ij}} \qquad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

در معادلات اخیر، u_i مؤلفه‌های سرعت جریان، k انرژی جنبشی آشفتگی، ε نرخ تلفات انرژی جنبشی آشفتگی، S متوسط نرخ تانسور کرنش و S_{ij} نرخ تانسور کرنش است. همچنین داریم:

$$C_2 = 1.9 \qquad \sigma_k = 1.0 \qquad \sigma_z = 1.2 \qquad (٧)$$

معادلات حرکت ذرات بدون در نظر گرفتن چرخش

چنانچه ذکر شد، در این تحقیق فاز گسسته به روش لاگرانژی بررسی می‌گردد. امروزه امکان بررسی تعداد ذرات کم یا فاز پراکنده به‌صورت رقیق میّسر است. همچنین به علّت رقیق بودن فاز پراکنده از اثر متقابل ذرات و برخورد ذرات با یکدیگر صرف‌نظر شده است.

تعادل نیرو عبارت است از برابری نیروی اینرسی با نیروهای وارد بر ذرّه. تعادل نیرو در این حالت در معادله (۸) نشان داده شده است. با حل معادلهٔ حرکت ذرات، سرعت و موقعیت هر ذرّه محاسبه می‌شود.

$$\frac{du_P}{dt} = F_D + F_G + F \qquad (٨)$$

که F_D نیروی پسا بر واحد جرم ذرّه، F_G نیروی شناوری بر واحد جرم ذرّه و F سایر نیروهای بر واحد جرم ذرّه مانند نیروی برآی سافمن، نیروی جرم مجازی و نیروی گرادیان فشاری است.

$$u_P = \frac{dX_p}{dt} \quad (۹)$$

در معادلهٔ (۹)، u_P بردار موقعیت مکانی ذرّه را نشان می‌دهند. کمّیت F_D در معادلهٔ (۱۰) نیروی پسا بر واحد جرم ذرّه است. نیروی پسا مهم‌ترین نیروی وارد از سیّال به ذرّه است که به دلیل اختلاف سرعت سیّال و ذرّه حاصل می‌شود.

$$F_D = \frac{(u_f - u_p)}{\tau_r} \quad (۱۰)$$

در معادلهٔ (۱۰)، u_f سرعت سیّال و τ_r زمان آرامش ذرّه می‌باشند. τ_r از معادلهٔ (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\tau_r = \frac{\rho_p\, d_p^2\, 24}{18_{\mu f}\, C_D\, Re_P} \quad (۱۱)$$

که ρ_p چگالی ذرّه، d_p قطره ذرّه، μ_f لزجت دینامیکی سیّال و Re_P عدد رینولدز نسبی ذرّه است.

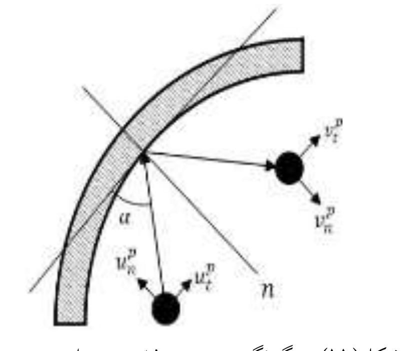
$$Re_P = \frac{\rho_p d_p \left|u_f - u_p\right|}{\mu_f} \quad (۱۲)$$

در رابطهٔ (۱۳) C_D ضریب پسا است.

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \quad (۱۳)$$

همچنین در معادلهٔ (۱٤) کمیت F_G نیروهای گرانش و شناوری بر واحد جرم ذرّه است.

$$F_G = \left(1 + \frac{1}{S}\right)\rho_g \quad (۱٤)$$



شکل(۱۱): چگونگی برخورد ذرّه به دیوار خمیده [6]

معادلهٔ سایش DNV[6]

به‌منظور جلوگیری از سایش ناشی از ذرات جامد، انواع مدل‌های سایش جهت پیش‌بینی و بهبود طراحی اولیه و شرایط کاری توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها بر اساس نتایج آزمایشگاهی و در شرایط خاص پیشنهاد گردیده است. با توجّه به عدم وجود پیش‌بینی سایش با دقّت بالا در صنعت، اکثر مدل‌های سایش که در صنعت نفت و گاز استفاده می‌شود، محافظه‌کارانه بوده و نیاز به بررسی بیشتری دارند. DNV [6] رابطه‌ای برای پیش‌بینی نرخ سایش پیشنهاد داده است که بر اساس آن، داده‌های تجربی و عددی بسیار برای هندسه‌های مختلف از جمله زانویی‌ها و سه‌راهی‌ها مورد نیاز است. برای لوله‌های فولادی، رابطهٔ پیشنهادی DNV [6] به‌صورت معادلهٔ (۱۵) است.

$$ER = 2.0 \times 10^{-9}\, V_P^{2.6}\, F(\alpha) \quad (۱۵)$$

که α زاویهٔ برخورد ذرّه، V_p سرعت ذرّه در لحظه برخورد و $F(\alpha)$ تابع زاویهٔ برخورد است.

$$F(\alpha)_t = \sum_{i=1}^{\alpha} A_i(\alpha)^i \quad (۱٦)$$

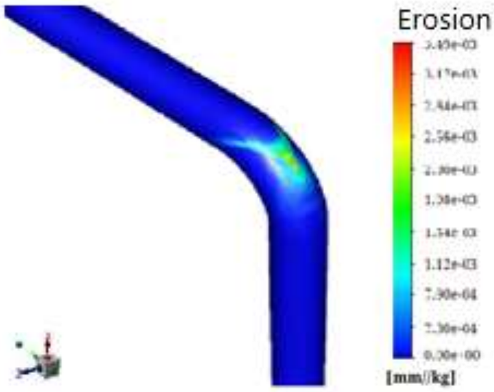
$$\begin{aligned} A_1 &= 9.370 & A_2 &= -42.295 \\ A_3 &= 110.864 & A_4 &= -175.804 \\ A_5 &= 170.137 & A_6 &= -98.398 \\ A_7 &= 31.211 & A_8 &= -4.170 \end{aligned} \quad (۱۷)$$

مقادیر ثابت A_i در روابط (۱۷) آمده است.

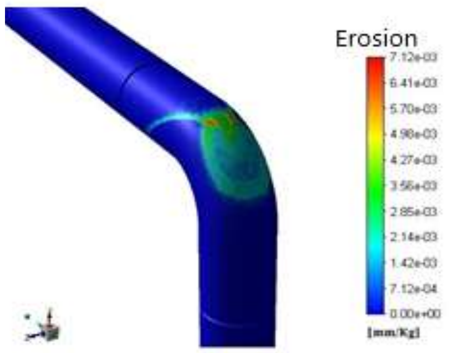
نتایج و بحث روی نتایج

ابتدا به بررسی کانتور خوردگی در شرایط بدون جوش برای زانویی با قطر ۳ اینچ پرداخته می‌شود شکل (۱۲). همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین میزان خوردگی مربوط به قسمت زانویی لوله است. میزان ماکزیمم خوردگی در کل لوله در این حالت برابر ۰,۰۰۳٤۵ میلی‌متر بر کیلوگرم است. زمانی که تحت همان شرایط میزان خوردگی زانویی با در نظر گرفتن ۳ میلی‌متر جوش لحاظ می‌شود شکل (۱۳)، این میزان مطابق با نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه به میزان ۰,۰۰۷۱۲ میلی‌متر بر

کیلوگرم افزایش می‌یابد

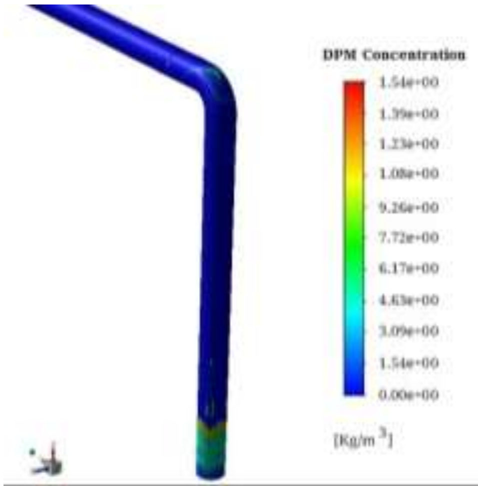


شکل(۱۲): کانتور توزیع خوردگی در زانویی بدون جوش محیطی



شکل(۱۳): کانتور توزیع خوردگی در زانویی با جوش محیطی

این نتایج نشان می‌دهد در حالتی که بررسی پدیدهٔ فرسایش ناشی از ذرات جامد در جریان گاز بدون در نظر گرفته اتصال، در نظر گرفته شود تغییرات خاصی را نشان داده و میزان خوردگی را بیشتر نشان می‌دهد. در ضمن با در نظر گرفتن جوش‌های اتصال در دو طرف اتصال، می‌توان محل بروز بیشترین خوردگی را نیز تخمین زد. از طرف دیگر با توجّه به اینکه در پدیدهٔ خوردگی سایشی، ذرات جامد نقش اصلی را بازی می‌کنند، بنابراین باید مسیر حرکت و همچنین میزان تمرکز آن‌ها را در داخل زانویی را نیز بررسی کرد. همان‌گونه که در شکل(۱٤) مشاهده می‌شود بیشترین تمرکز ذرات در ابتدای مسیر ورود به زانویی و در قسمت پایین لوله بوده و مقدار آن به‌طور متوسط ۱,۵ کیلوگرم بر واحد حجم است. به‌عبارت‌دیگر در ابتدای قسمت ورودی که تجمع ذرات جامد بیشتر است به نظر می‌رسد خطر بروز فرسایش بیشتر باشد که با نتایج به دست آمده در شکل (۱۳) نیز همخوانی دارد.

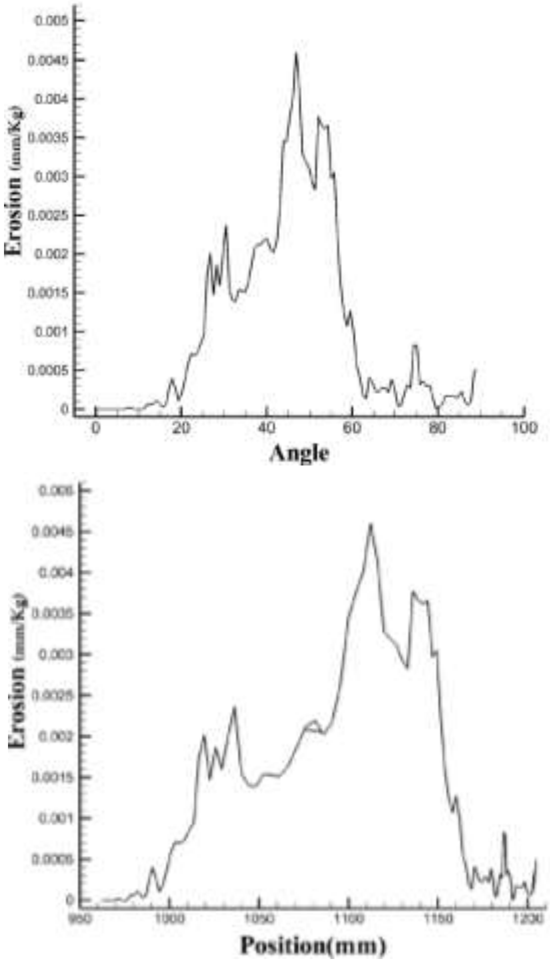


شکل(۱٤): نحوهٔ تجمع ذرات داخل زانویی با جوش

.

در شکل ۱۵ مسیر حرکت ذرات در دو حالت بدون جوش و با در نظر گرفتن جوش محیطی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است مسیر ذرات در هر دو حالت یکسان بوده ولی توزیع ذرات تغییر می‌کند. به صورتی که توزیع ذرات از مقدار 7.52E-02 میلی‌متر به ازای هر کیلوگرم در حالت بدون جوش به مقدار-1.28E 01 میلی‌متر به ازای هر کیلوگرم با در نظر گرفتن جوش تبدیل می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۱۰، که نمودار خوردگی بر حسب موقعیت لوله را نشان می‌دهد، خوردگی از قسمتی شروع می‌شود که ذرات شروع به برخورد زاویه‌ای با سطح کرده و قسمتی از لوله که تماس (برخورد) بیشتر با ذرات داشته دچار خوردگی فرسایشی بیشتری شده است که در این حالت زاویهٔ برخورد ذرات ٤۵ درجه است. در ضمن در محل جوش

اول سرعت ذرات بسیار بالا است و به بیش از سرعت ۲۰ m/s نیز می‌رسد که باعث فرسایش در لوله در این قسمت می‌شود. برعکس در نزدیکی محل جوش قسمت افقی زانویی یعنی جوش دوم، سرعت ذرات کاهش می‌یابد زاویهٔ برخورد و طول معادل زانویی در این بخش ارائه شده است. با برخورد ذرات جامد با زوایای ٤٧ درجه و ۵۸ درجه به دیوارهٔ لوله در هنگام روبرو بودن با نفوذ اضافه جوش بیشترین خوردگی سایشی در زانویی ایجاد می‌شود. این میزان بین زوایای ۰ تا ٦۰ روند صعودی داشته و بین ٦۰ تا ۹۰ به‌شدّت کاهش می‌یابد. در این میان سرعت حرکت ذرات جامد و به طبع میزان ضربه آنها به دیوارهٔ لوله و اتصالات نیز کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

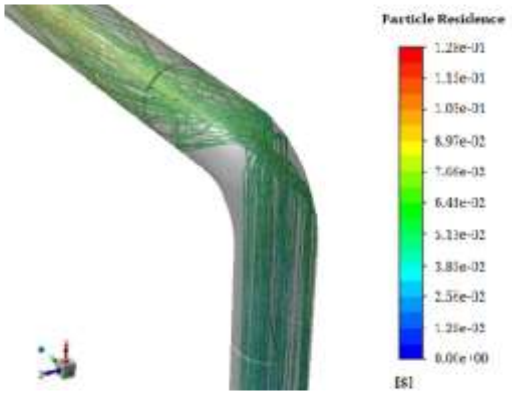


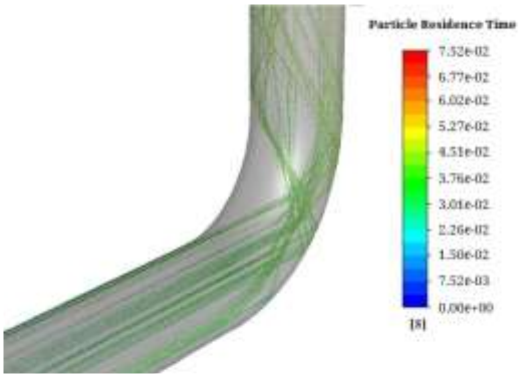
شکل(۱۵): توزیع خوردگی فرسایشی بر اساس نسبت طول زانویی و زاویهٔ برخورد ذرات به لوله

به‌عبارتی‌دیگر سرعت به میزان ۲۳ متر بر ثانیه رسیده و پس از برخورد ذرات به دیوارهٔ بالایی جوش سرعت به‌طور چشمگیری کاهش یافته و حتّی به میزان ۲ تا ۰ متر بر ثانیه نیز می‌رسد. این مسأله مبیّن آن است که در امتداد خط افقی متصل‌شونده به فیلتر جداکننده (اولین فیلتر موجود در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز) و پس از عبور ذرات جامد از محل جوش دوم، حتّی با وجود شعاع نفوذ اضافه جوش برای جوش دوم، نرخ خوردگی فرسایشی به‌صورت واضحی کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که از دو شکل (١٦) مشخص است، با در نظر گرفتن جوش محیطی و یا در نظر گرفتن آن تغییری در خصوص شکل نمادین نحوهٔ تجمع ذرات مشاهده نمی‌گردد و در دو حالت ذرات به‌صورت زیگزاگی و یا درواقع وی شکل به دیواره‌های زانویی برخورد کرده و به مسیر خود ادامه می‌دهند. آنچه در این حالت متفاوت است صرفاً حجم ذراتی است که در امتداد این مسیر حرکت کرده و نتایج نشان می‌دهد که دبی ذرات در حالتی که برآمدگی ناشی از حضور جوش محیطی در هندسهٔ داخلی اتصال وجود دارد به نسبت حالتی که اصلاً جوشی برای اتصال در نظر گرفته نمی‌شود، بیشتر است.

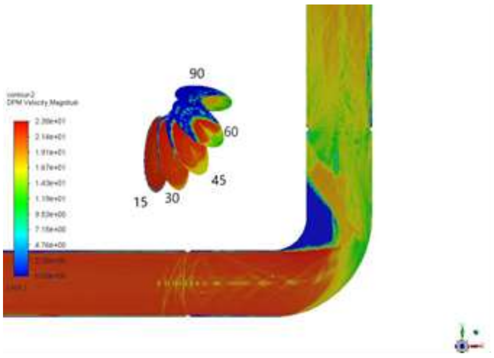
از طرف دیگری وجود همین زائدهٔ کوچک ناشی از حضور جوش در هندسهٔ داخلی، باعث می‌شود به دلیل برخورد ذرات به یک سطح بسیار کوچک (برای این زانویی با این ابعاد ۳ میلی‌متر بر اساس استانداردهای متداول گاز در ایران) و نیز توجّه به اینکه به‌طورمعمول در گاز طبیعی آب نیز وجود دارد برخورد ذرات به این زائده اگر موجب بروز ترک مویی شود، امکان ایجاد فرسایش را تشدید می‌کند.





شکل(١٦): مسیر حرکت ذرات در دو حالت بدون جوش و با در نظر گرفتن جوش محیطی همراه با نفوذ اضافه

همان‌طور که در شکل شمارهٔ (۱۷) ، با برخورد ذرات جامد با زوایای ٤٧ درجه و ٥٨ درجه به دیوارهٔ لوله در هنگام روبرو بودن با نفوذ اضافه جوش بیشترین خوردگی سایشی در زانویی ایجاد می‌شود. این میزان بین زوایای ۰ تا ٦٠ روند صعودی داشته و بین ٦٠ تا ۹۰ به‌شدّت کاهش می‌یابد. در این میان سرعت حرکت ذرات جامد و به طبع میزان ضربه آنها به دیوارهٔ لوله و اتصالات نیز کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. به‌عبارتی‌دیگر میزان سرعت به‌سرعت به میزان ۲۳ متر بر ثانیه رسیده و پس از برخورد ذرات به دیوارهٔ بالایی جوش سرعت به‌طور چشمگیری کاهش یافته و حتّی به میزان ۲ تا ۰ متر بر ثانیه نیز می‌رسد.



شکل(۱۷): مسیر کانتور سرعت متوسط ذرات برای سرعت ۲۰ متر بر ثانیه و قطر ذرات ۲۰۰ میکرون

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه میزان خوردگی فرسایشی یک اتصال مانند زانویی در حضور جوش محیطی، علی‌رغم استاندارد بودن میزان جوش محیطی که برای مورد مطالعه، ۳ میلی‌متر (طبق استاندارد ASME B31.3[۳۰]) اعلام شده است در گاز طبیعی ایران دچار مساله بوده و باید حدود قابل قبول برای آن بازنگری گردد. به دلیل آلوده بودن گاز طبیعی در ایران به ذرات جامد و با توجّه به این مطلب که آنالیز گاز طبق تحقیقات قبلی (مولا و همکاران [۲۲])، وجود آب در سیّال گاز را نشان می‌دهد، همین میزان خوردگی در حضور آب، جنس لوله که کربن استیل است را در معرض خوردگی سایشی شدید قرار می‌دهد که نتایج تجربی به دست آمده در ایستگاه تقلیل فشار گاز نیز، این مسأله را تأیید می‌کند. در ضمن با در نظر گرفتن شتاب جاذبه میزان خوردگی در حضور جوش محیطی در دو نقطه یکی جوش قسمت پایین اتصال و دیگری زانویی اتصال نشان داده می‌شود و این در حالی است که در مطالعات پیشین زمانی که جوش در نظر گرفته نمی‌شود صرفاً در قسمت بالای زانویی این خوردگی فرسایشی پیش‌بینی می‌شده است.

نتایج این تحقیق بیانگر این مسأله است که با در نظر گرفتن جوش در اتصالات ایستگاه‌های گاز، اگر ذرات جامد موجود در جریان که بیشتر شن و ماسه در نظر گرفته می‌شوند و کامل فیلتر نشوند، می‌توانند نقش

مؤثری در بروز فرسایش زودهنگام اتصالات ایجاد نمایند.این مساله را وجود ذرات آب در جریان گاز-جامد، تشدید و تسریع می‌نماید. این موضوع اهمّیّت فیلتراسیون گاز موجود در ایستگاه‌ها را بیان کرده و در نظر گرفتن تمهیداتی برای حذف نفوذ اضافه جوش را تأکید می‌نماید. این پژوهش بدون در نظر گرفتن چرخش ذرات جامد در داخل اتصالات و لوله‌کشی ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز انجام گرفته و سیّال فقط محتوی ذرات جامد در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی‌شده است درحالی‌که بنا بر مشخصات گاز ورودی به ایستگاه مبارکه، احتمال حضور مایعاتی نظیر آب در سیّال گاز نیز وجود دارد و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده بررسی این دو موضوع برای ادامه راه، مد نظر قرار گیرد. در ضمن در این مطالعه صرفاً از مدل فرسایشی DNV [6] ، برای محاسبه نرخ خوردگی استفاده شده و پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی از معادلات دیگری نظیر اوکا و زانگ، برای پیش‌بینی فرسایش استفاده شده و نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه شود. در ضمن در تحلیل DPM فقط ذرات کروی در نظر گرفته شدند ولی در واقعیت ذرات گوشه‌دار و نوک‌تیز نیز وجود دارند که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی اثر شکل آنها بر نرخ خوردگی تحلیل گردد.

تشکّر و قدردانی

این مطالعه بر اساس حمایت مالی شرکت گاز استان اصفهان انجام پذیرفته است و نویسندگان مراتب تشکّر و قدردانی خود را به‌واسطهٔ این حمایت از شرکت گاز اصفهان و همچنین از دانشگاه آزاد نجف‌آباد اعلام می‌نمایند.

فهرست واژگان

جوش محیطی	Circumferential welding
خوردگی	Corrosion
اثر زیرسازی	Discrete
روش المان گسسته	Element Method (DPM)
مدل گردشی تصادفی گسسته	Discrete Random Walk
مدل های آشفتگی ویسکوزیته گردابی	viscosity models- Eddy
عدد رنولدز پایین	Reynolds number-Low
زانویی	Elbow

مراجع

۱. ابراهیم، محسنی هماگرانی، عبدالرسول، محسنی هماگرانی، "تفسیر فیلم های رادیوگرافی صنعتی"، انتشارات سنجش سپاهان، اصفهان، (۱۳۸۸).

۲. حسین،عسگری، "خوردگی در پالایشگاه‌ها"، دپارتمان تحقیق و توسعه شرکت آذر انرژی تبریز، انتشارات شرکت آذرانرژی تبریز، تبریز، (۱۳۸۹).

۳. جعفر، زکی زاده، "شناخت لوله واتصالات"، اداره تحقیقات بازرگانی و پیمانکاری، امور خدمات فنی و تخصیص کالا، تهران، (۱۳۸٤).

٤. ابراهیم، خیر، "مرجع مکانیزم‌های تخریب تجهیزات فرآیندی در صنایع نفت، گاز، پالایشی و پتروشیمی"، جلد اول، مکانیزم های تخریب مشترک، انتشارات راز نهان، تهران، (۱۳۹۲).

5. Crook., "Practical guide to wear for corrosion engineers", (1991)

6. Veritas D. N., "Recommended Practice RP (501 Erosive Wear in Piping Systems", Technical report, DNV RP 0501-Revision 4.2, pp. 1-111 & pp. 1-39, (2007).

۷. شرکت گاز اصفهان، "اسناد و مستندات بازرسی فنی از ایستگاه تقلیل فشار مبارکه"، شرکت گاز اصفهان، اصفهان،(۱۳۹۸).

8. Finnie. I., "Erosion of metal by solid particles", *Journal of Wear*, Vol. 3, pp. 87-103, (1967).

9. Chen. X. H., McLury. B. S., Shirazi. S. A., "Application and experimental validation of a computational fluid dynmics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees", *Journal of Computers & Fluids*, Vol. 33, pp. 1251-1272, (2004).

10. Xionga. Z., Ji, Zhong. L., Xiaolin. Wu., Youfang. C., Hongsheng. C., "Experimental and numerical simulation Investigations on particle sampling for high-pressure natural gas", *Journal of Fuel*, Vol. 87, pp. 3096-3104, (2008).

11., Kamyar. N., Mclaury. S., Shirazi. B., Siamack. L., Hill. A., Cremaschi. S., "A generalized model to predict minimum particle transport velocities in multiphase air-water horizontal pipes", *AIChE Journal*, Volume 61, (2015).

12. Oka. Y. I., Okamura. K., Yoshida. T., "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation", *Journal of Wear*, Vol. 259, No. 1, pp. 95-101, (2005).

13. Grant. G., Tabakoff. W., "Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles", *Journal of Aircraft*. Vol. 12, No. 5, pp. 471-478, (1975).

١٤. داوود، شفیعی، کوروش، خورشیدی، مصطفی، مروجی، "تحلیل عددی ایجاد سایش ناشی از جریان گاز در خطوط لوله وایستگاه‌های گاز"، مجله پژوهش نفت، شماره ۷۸، تهران، (۱۳۹۳).

15. Siyamac. P., H., Agrawal. M., Snirivasan. V., Roland. E. V., Carlos. T., Laury. B. S. Mc., Siyamac. S., "CFD Simulation of Sand Particles Erosion in gas-dominant multiphase flow", DNV GL. Katy TX.USA, BP Hoston. TX. USA, ANSYS Inc. Hoston. TX. USA, Erosion / Corrosion Center. Thermal Sience Department, the University of Los Andes. Merida 5101.Venzuela, (2015).

16. Duarte. C. A. R., De Souza. F.J., Dos Santas V. F., "Numerical Investigation of mass loading Effects on Elbow Erosion", *Journal of Powder Technol*, Vol. 283, pp. 593-606, (2015).

17. Arabnejad .H, Mansouri. A., Shirazi. S. A., Mclaury. B. S., "Development of mechanistic erosion equation for solid particles", *Wear*, pp. 332-333 & 1044 -1050, (2015).

18. Vieira.R.E., Parsi. M., Kesana. N., Maclaury. B. S., Shirazi. S. A., "Ultrasonic Measurments of sand particle erosion in gas dominant multiphase churn flow in vertical pipes", *Journal of Wear*, pp. 332-333 & 1044 -1050, (2015).

19. Okonkwo, C. P., Mohamed, A. M., "Erosion –Corrosion in oil and Gas Industry A Review",

International Journal of Metallurgical & Materials Science and Engineering (IJMMSE), Vol. 4, (2014).

۲۰. مرتضی، یاره، افشین، احمدی ندوشن، مریم، حسن زاده سورنجانی،"شبیه‌سازی عددی خوردگی سایشی در یک خط لوله جریان گاز"، اولین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک و هوا فضا،(۲۰۱٦).

21. Zamani. M., Seddighi. S., Nazifi. H. R., "Erosion of natural gas elbows due to rotating particles in turbulent gas-solid flow", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, (2017).

۲۲. داریوش، مولا، جعفر، قاجار، نادر، سلیمی، "روش بهینه سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز"، شرکت گاز استان فارس، (۱۳۸۵).

23. "Low-Dimensional Systems and Nanostructures", Report No. 93, pp. 179-189., (2017)

24. "International Journal of Mechanical Sciences", Report No. 131, pp. 1106-1116., (2017).

25. "journal of Thermal Analysis and Calorimetry", Report No. 132, pp. 741-759., (2018).

26. "Low-Dimensional Systems and Nanostructures", Report No. 96, pp. 73-84., (2018).

27. "Low-dimensional Systems and Nanostructures", Report No. 84, pp. 454-465., (2016).

28. "Journal of Thermal Analysis and Calorimetry", Report No. 135(6), pp. 3471-3483., (2019).

29. "Low-dimensional Systems and Nanostructures", Report No. 84, pp. 454-465., (2019).

30. ASME B31.3., "Process Piping Code and Welding", ASME Center., (2016).